

• 科研论著 •

基于功能性近红外光谱的学龄前孤独症谱系障碍儿童脑功能特征研究

张林^{1,2}, 张建平³, 江才明⁴, 邵智^{1,2}

1. 重庆市第九人民医院儿童孤独症康复治疗中心, 重庆 400700; 2. 重庆市儿童孤独症医学研究中心, 重庆 400700;
3. 西南大学医学研究院; 4. 重庆市第九人民医院放射科

摘要: **目的** 探讨学龄前孤独症谱系障碍(ASD)儿童的脑功能网络特征,为研究儿童 ASD 的病理机制提供理论依据。**方法** 选取 2022 年 9 月—2023 年 10 月在重庆市儿童孤独症康复治疗中心接受干预的 28 例 4~6 岁 ASD 儿童和 20 例年龄匹配的正常发育儿童,采集静息态功能性近红外光谱(fNIRS)成像数据,采用图论分析方法,以全局(全局效率、局部效率)和节点指标(节点度、节点效率)为因变量,比较两组儿童在脑功能拓扑属性上的差异。**结果** 与正常发育儿童相比,ASD 儿童在内侧前额叶脑区表现出更高的节点度($t=5.570$, $P=0.023$)和更低的节点效率($t=6.916$, $P=0.012$)。在全局指标方面,排除性别因素的影响后,ASD 组儿童具有更高的局部效率($t=4.714$, $P=0.036$)和更低的全局效率($t=5.862$, $P=0.020$)。**结论** 内侧前额叶皮层是学龄前 ASD 儿童重要的信息传递中枢,与正常发育组相比,ASD 儿童在信息整合和全局信息传递方面存在不足,但在局部信息传递和分化方面存在一定优势。

关键词: 孤独症谱系障碍; 功能性近红外光谱成像; 图论; 内侧前额叶皮层; 学龄前儿童

中图分类号: R179 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-6579(2025)06-0597-06 **doi:** 10.11852/zgetbjzz2024-0853

Brain function characteristics of preschool children with autism spectrum disorder based on functional near infrared spectroscopy

ZHANG Lin^{1,2}, ZHANG Jianping³, JIANG Caiming⁴, SHAO Zhi^{1,2}

1. Chongqing Ninth People's Hospital Rehabilitation and Treatment Center for Children with ASD, Chongqing 400700, China; 2. Medical Research Center for Children with ASD of Chongqing, Chongqing 400700, China; 3. Southwest University Medical Research Institute; 4. Department of Radiology, Chongqing Ninth People's Hospital

Corresponding author: SHAO Zhi, E-mail: 779405151@qq.com

Abstract: **Objective** To explore the characteristics of brain functional networks in preschool children with autism spectrum disorder(ASD), in order to provide a theoretical basis for the pathological mechanism of ASD. **Methods** From September 2022 to October 2023, 28 children aged 4 to 6 years with ASD receiving intervention in the Rehabilitation Treatment Center for Children with ASD of Chongqing and 20 age-matched typically developed children were selected. Resting-state functional near-infrared spectroscopy(fNIRS) imaging data were collected. Graph theory analysis was used to compare differences in brain functional topological properties between the two groups, with global indices(global efficiency, local efficiency) and nodal indices(nodal degree, nodal efficiency) as dependent variables. **Results** Compared with typically developed children, children with ASD exhibited higher nodal degree($t=5.570$, $P=0.023$) and lower nodal efficiency($t=6.916$, $P=0.012$) in the medial prefrontal cortex(mPFC). In terms of global indices, after excluding the influence of gender, ASD children had higher local efficiency($t=4.714$, $P=0.036$) and lower global efficiency($t=5.862$, $P=0.020$). **Conclusions** The mPFC serves as an important information transmission hub in preschool children with ASD. Compared with typically developed children, children with ASD have deficiencies in information integration and global information transmission but exhibit certain advantages in local information transmission and differentiation.

Keywords: autism spectrum disorder; functional near-infrared spectroscopy; graph theory; medial prefrontal cortex; preschool children

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0045); 重庆英才·创新领军人才项目(技术创新与应用发展)(CQYC20200303136)

作者简介: 张林(1994—),男,硕士学位,主要研究方向为孤独症儿童的心理行为干预。

通信作者: 邵智, E-mail: 779405151@qq.com

孤独症谱系障碍 (autism spectrum disorder, ASD) 是一种严重的神经发育障碍, 其发病机制尚不明确^[1-2]。近年来, ASD 儿童脑功能机制逐渐成为研究热点。基于图论的方法分析青春期 ASD 群体的脑功能网络研究显示, ASD 存在内侧前额叶皮层 (medial prefrontal cortex, mPFC) 功能网络随年龄下降的异常发育特征^[3-4]。另一项对青年 ASD 的研究发现, ASD 患者脑功能网络的聚类系数和最短路径长度存在缺陷^[5]。然而, 关于学龄前 ASD 儿童大脑网络特征的研究却鲜有报道。

学龄前期是儿童脑神经发育的关键时期, 从大脑功能网络角度探究学龄前 ASD 儿童的网络拓扑属性, 有助于理解大脑网络结构的发育轨迹, 对理解 ASD 儿童的病理机制至关重要。因此, 本研究通过与正常发育儿童 (typically developed child, TDC) 对比, 采集静息态功能性近红外光谱 (functional near infrared spectroscopy, fNIRS) 脑成像数据, 基于图论的方法分析 ASD 儿童大脑前额叶皮层 (prefrontal cortex, PFC) 的脑功能网络特征, 为研究 ASD 患者的病理机制提供理论依据。

1 对象和方法

1.1 对象 2022 年 9 月—2023 年 10 月在重庆市第九人民医院儿童孤独症康复治疗中心招募 33 例 ASD 儿童。纳入标准: 1) 符合《精神障碍诊断和统计手册 (第 5 版)》^[6] 中 ASD 诊断标准; 2) 年龄 4~6 岁; 3) 心理教育量表 (第三版) (Psychoeducational Profile-Third Edition, PEP-3)^[7] 中沟通发展年龄 ≥ 36 月龄; 4) 韦氏学龄前智力量表 (Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence, WPPSI)^[7] 全量表智商 ≥ 70 分。排除标准: 1) 有癫痫发作史; 2) 服用任何神经或精神药物; 3) 无法完成测试。同时招募 23 例年龄匹配的正常发育儿童作为对照组 (TDC 组)。本研究中, ASD 组均为配合度较高的智力发育正常的儿童, 但 5 例 ASD 患儿和 3 例 TDC 儿童因多动而未完成测试, 最终有效样本为 ASD 儿童 28 例, TDC 儿童 20 例。本研究获得重庆市第九人民医院医学伦理委员会审核批准【编号: 2021 (伦审) 科-007 号】, 所有被试儿童父母均签署知情同意书。

1.2 fNIRS 数据采集 采用连续波 fNIRS 设备 (ETG-ONE, 日本日立) 进行数据采集, 通过测量光学变化获得血氧动力学信号, 采样率为 10 Hz。基于国际 10-20 标准导联系统, 设计覆盖大前额叶的光极板, 包含 7 个光源和 8 探测器 (间距 30 mm), 形成 22 个测量通道。使用 3D 定位仪 (PATRIOT, Polhemus, USA) 确定每个通道的神经解剖位置, 并导

入 NIRS_SPM 软件获得 MNI 坐标及每个通道所分布区域的可能性估计^[8]。图 1 展示了由 BrainNet Viewer^[9] 生成的大脑测量区域和通道分布图, 主要覆盖背外侧额上回 (DLPFC, 通道 1、2、3、4、6、7、8、10、13)、额中回 (MFG, 通道 5、9)、内侧前额叶 (mPFC, 通道 11、12、15、16、17、19、20、21、22) 和眶额皮层 (OFC, 通道 14、18)。

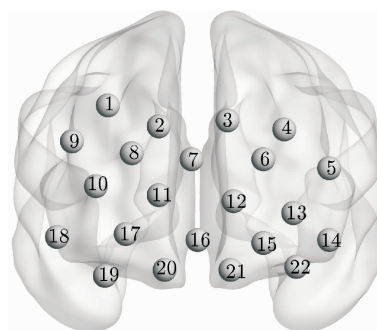


图 1 涵盖前额叶网络的 22 通道排列图

Fig. 1 22-channel arrangement map covering the prefrontal network

所有儿童在家长的陪同下进行 6 min 30 s 的静息态数据采集。鉴于低龄 ASD 儿童情绪性行为和自我控制较弱的特点, 参考 Li 等^[10] 的研究设计, 在数据收集过程中观看经重复和无声处理的《小猪佩奇》片段, 以帮助儿童配合完成数据采集。

1.3 fNIRS 数据分析

1.3.1 数据预处理 本研究采用 FC-NIRS 工具包^[11] 对 fNIRS 数据进行预处理。首先, 根据修正的 Beer-Lambert 定律将光学信号转换为氧合血红蛋白 (HbO) 和脱氧血红蛋白 (HbR) 相对浓度变化, 然后剔除不必要的时间序列。其次, 采用 0.01~0.10 Hz 带通滤波器去除低频漂移和低频神经生理噪声。最后, 采用主成分分析算法, 滤除第一主成分进行全局信号回归^[12-13]。研究表明, HbO 信号在捕捉大脑皮层血流变化方面具有较高灵敏度和信噪比, 故本研究主要关注 HbO 信号。

1.3.2 脑功能网络构建 利用 FC-NIRS 工具中的 Network Analysis 模块构建脑功能网络。首先, 计算每对通道间的 Pearson 相关系数 r , 然后使用 Fisher's z 变换将相关系数 r 转换为 z 值以提高正态性^[14]。通过一系列的稀疏阈值, 将 22×22 z 值矩阵转换为二值邻接矩阵。由于负值相关系数会影响图论分析的重测信度, 分析只采用正 z 值系数。

本研究选用网络稀疏度作为网络分析的阈值, 稀疏度是指网络边数占最大可能边数的比例^[3]。考虑到单一稀疏度阈值的不确定性, 计算了 0.1 到

0.5, 间隔为 0.01 的一系列稀疏度阈值下的脑网络拓扑特征。

1.3.3 脑网络分析 本研究检验了两组被试前额叶大脑网络是否具有小世界特征, 接着计算了大脑网络的 4 个拓扑学指标。1) 节点度: 连接到单个节点的边的数量, 表示其邻居的数量。2) 节点效率: 给定节点与网络中所有其他节点间最短路径长度的平均倒数, 反映其信息传播能力。3) 全局效率: 网络中任意两节点间最短路径长度的倒数, 测量功能整合性和量化网络中传递信息的能力。4) 局部效率: 局部子图中某一指定节点与相邻节点间传递信息的效率, 是衡量功能分化的指标。计算每个拓扑学指标的曲线下面积(area under curve, AUC)作为汇总变量, AUC 指数在检测脑部疾病拓扑变化方面具有高度敏感性, 在既往研究中广泛应用^[15]。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析。两组被试的网络拓扑结构用 $\bar{x} \pm s$ 描述, 采用独立样本 t 检验比较, 并将性别和 WPPSI 得分作为协变量。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 研究对象基本资料 两组间年龄比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$), ASD 组 WPPSI 得分显著低于 TDC 组 ($t = 4.244, P < 0.001$)。见表 1。

表 1 ASD 组与 TDC 组被试基本信息 ($\bar{x} \pm s$)

Tab. 1 Basic information of subjects in ASD group and TDC group ($\bar{x} \pm s$)

组别	男/女(例)	年龄(月)	PEP-3(月)	WPPSI(分)
ASD 组	28/0	61.11 ± 7.41	45.98 ± 6.40	99.46 ± 10.63
TDC 组	15/5	60.05 ± 8.83		113.10 ± 11.44
t 值		0.450		4.244
P 值		0.655		<0.001

2.2 ASD 与 TDC 儿童小世界特征检验 ASD 与 TDC 儿童在该脑区网络均呈现出典型的小世界网络结构, 体现为较高的聚类系数以及与随机网络相当的特征路径长度 ($\gamma > 1, \lambda \approx 1$)。见图 2。

2.3 ASD 与 TDC 儿童节点指标分析

2.3.1 节点度 ASD 组儿童在左侧 mPFC(通道 12)的节点度高于 TDC 组儿童 ($t = 5.570, P = 0.023$)。但在其他脑区, 两组儿童的节点度差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 2。

此外, 对男生被试 (ASD 组: 28 例, TDC 组: 15 例) 进行分析, 发现两组被试在左侧 mPFC(通道 12)的节点度呈边缘效应, 同样表现为 ASD 男生组高于 TDC 男生组 ($t = 3.805, P = 0.058$); 进一步在男生

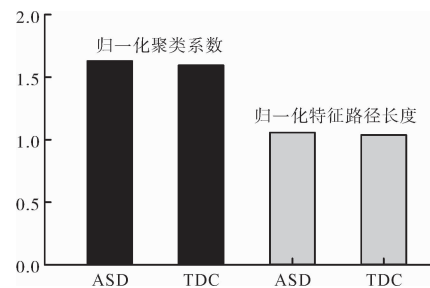


图 2 稀疏度为 0.3 时的归一化聚类系数和归一化特征路径长度

Fig. 2 Normalized clustering coefficient and normalized characteristic path length at sparsity of 0.3

被试中, 以年龄 ($P > 0.05$) 和智力水平 ($P > 0.05$) 进行一对一匹配 (ASD 组: 15 例, TDC 组: 15 例), 同样发现 ASD 匹配组在左侧 mPFC(通道 12)的节点度更高 ($t = 3.401, P = 0.076$)。见图 3a、3b。

2.3.2 节点效率 ASD 组儿童在左侧 mPFC(通道 15)的节点效率显著低于 TDC 组 ($t = 6.916, P = 0.012$)。但在其他脑区, 两组被试的节点效率比较, 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见表 2。

对男生被试的分析发现, ASD 男生组在左侧 mPFC(通道 15)的节点效率低于 TDC 男生组 ($t = 4.614, P = 0.038$); 男性被试匹配后的分析发现, 同样发现 ASD 组左侧 mPFC(通道 15)的节点效率更低 ($t = 4.907, P = 0.035$)。见图 4a、4b。

2.4 ASD 与 TDC 儿童全局指标分析

2.4.1 全局效率 ASD 组的全局效率低于 TDC 组, 但差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见图 5a。进一步仅对男性被试的分析发现, ASD 男生组的全局效率显著低于 TDC 男生组 ($t = 5.862, P = 0.020$); 在男性被试匹配的条件下, ASD 组仍表现出较低的全局效率 ($t = 4.942, P = 0.035$)。见图 5b、5c。

2.4.2 局部效率 ASD 组的局部效率高于 TDC 组, 但差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。见图 6a。仅男性的分析发现 ASD 男生组的局部效率显著高于 TDC 男生组 ($t = 4.714, P = 0.036$); 在男性被试匹配的条件下, ASD 组仍表现出较高的局部效率 ($t = 5.615, P = 0.025$)。见图 6b、6c。

3 讨论

本研究采用图论方法分析学龄前 ASD 儿童大脑 PFC 的功能拓扑属性特征, HbO 数据分析表明, 与 TDC 儿童相比, ASD 儿童在 mPFC 区域的节点度更高, 而节点效率更低。进一步分析仅男性被试的全局拓扑指标, 发现 ASD 组的局部效率更高、全局效率更低。

表 2 ASD 组与 TDC 组节点指标比较($\bar{x} \pm s$)

Tab. 2 Comparison of node indicators in the ASD group and TDC group($\bar{x} \pm s$)

通道	脑区	节点度				节点效率			
		ASD 组($n=28$)	TDC 组($n=20$)	t 值	P 值	ASD 组($n=28$)	TDC 组($n=20$)	t 值	P 值
1	右侧背外侧额上回	0.930±0.486	0.649±0.417	3.110	0.085	0.088±0.033	0.076±0.317	0.798	0.376
2	右侧背外侧额上回	0.843±0.482	0.679±0.435	0.562	0.457	0.081±0.036	0.078±0.042	0.018	0.893
3	左侧背外侧额上回	0.345±0.519	0.487±0.428	0.092	0.763	0.033±0.044	0.047±0.048	1.449	0.235
4	左侧背外侧额上回	0.824±0.425	0.873±0.428	0.977	0.328	0.085±0.032	0.091±0.031	0.482	0.491
5	左侧额中回	0.993±0.560	0.759±0.414	0.568	0.455	0.091±0.032	0.083±0.033	0.323	0.573
6	左侧背外侧额上回	1.079±0.481	0.920±0.515	1.015	0.319	0.098±0.024	0.094±0.026	0.193	0.663
7	背外侧额上回	0.782±0.546	0.892±0.442	0.042	0.839	0.079±0.041	0.092±0.029	0.540	0.466
8	右侧背外侧额上回	0.967±0.491	0.980±0.373	0.061	0.806	0.092±0.030	0.098±0.026	0.578	0.451
9	右侧额中回	0.941±0.497	0.886±0.517	0.003	0.957	0.090±0.034	0.090±0.033	0.107	0.745
10	右侧背外侧额上回	1.108±0.575	1.065±0.489	0.144	0.706	0.096±0.032	0.101±0.023	0.814	0.372
11	右侧内侧前额叶	1.199±0.444	1.107±0.259	0.219	0.642	0.105±0.018	0.107±0.013	0.156	0.695
12	左侧内侧前额叶	0.961±0.395	0.708±0.512	5.570	0.023	0.090±0.036	0.071±0.049	3.785	0.058
13	左侧背外侧额上回	0.946±0.395	1.117±0.442	0.730	0.397	0.095±0.020	0.103±0.029	0.452	0.505
14	左侧眶额皮层	1.002±0.426	0.939±0.286	0.081	0.777	0.094±0.029	0.099±0.014	1.736	0.194
15	左侧内侧前额叶	1.048±0.477	1.289±0.425	3.237	0.079	0.097±0.023	0.112±0.017	6.916	0.012
16	内侧前额叶	0.888±0.570	0.975±0.459	0.005	0.942	0.085±0.042	0.097±0.035	0.672	0.417
17	右侧内侧前额叶	0.927±0.439	1.104±0.321	0.851	0.361	0.090±0.027	0.105±0.022	1.729	0.195
18	右侧眶额皮层	0.943±0.507	1.124±0.457	0.618	0.436	0.088±0.027	0.106±0.018	2.360	0.132
19	右侧内侧前额叶	1.082±0.551	1.157±0.475	<0.001	0.990	0.099±0.024	0.108±0.019	0.615	0.437
20	右侧内侧前额叶	0.879±0.462	1.018±0.471	1.610	0.211	0.092±0.021	0.098±0.028	1.177	0.284
21	左侧内侧前额叶	0.851±0.561	0.811±0.429	0.334	0.566	0.083±0.041	0.089±0.031	0.001	0.977
22	左侧内侧前额叶	0.920±0.431	1.026±0.433	0.171	0.681	0.090±0.025	0.102±0.019	1.194	0.280

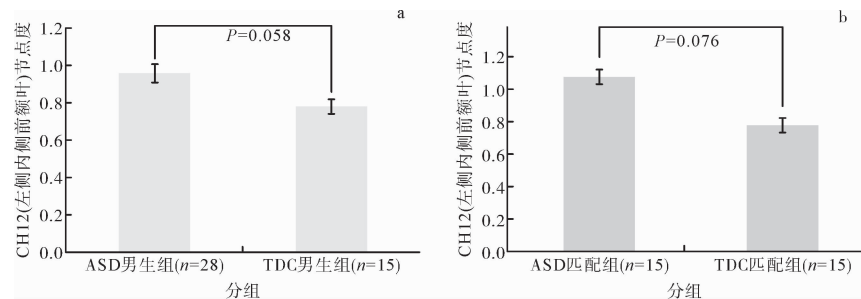


图 3 ASD 组与 TDC 组节点度差异

Fig. 3 Differences in node degree between ASD group and TDC group

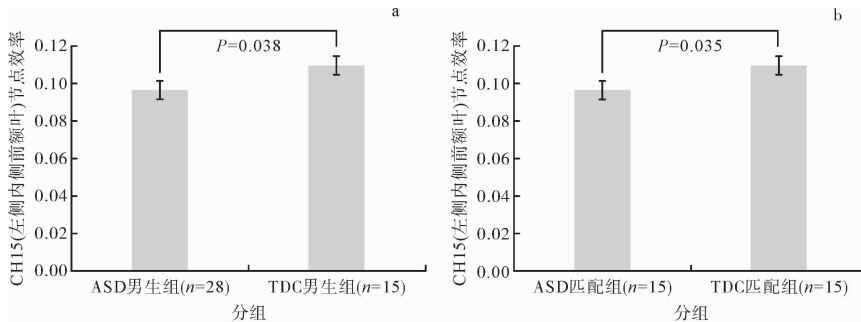


图 4 ASD 组与 TDC 组节点效率差异

Fig. 4 Differences in node efficiency between ASD group and TDC group

3.1 ASD 儿童节点指标变化 本研究发现,学龄前 ASD 儿童在 mPFC 脑区存在异常,与 TDC 儿童相比,表现出更高的节点度。节点度反映了一个节点与网络中其他节点的连接数量,可用于识别大脑

网络中的枢纽节点^[16]。研究结果表明,mPFC 是一个重要的枢纽节点,与周围脑区的连接更为紧密。这可能与 ASD 儿童在生命早期大脑发育过程中突触选择和剪修受损,导致过多突触连接有关^[17]。既

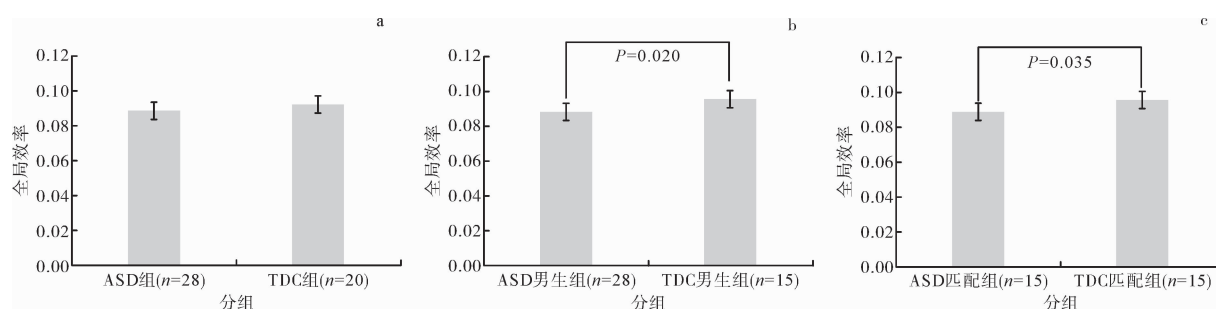


图 5 ASD 组与 TDC 组全局效率差异

Fig. 5 Differences in global efficiency between ASD group and TDC group

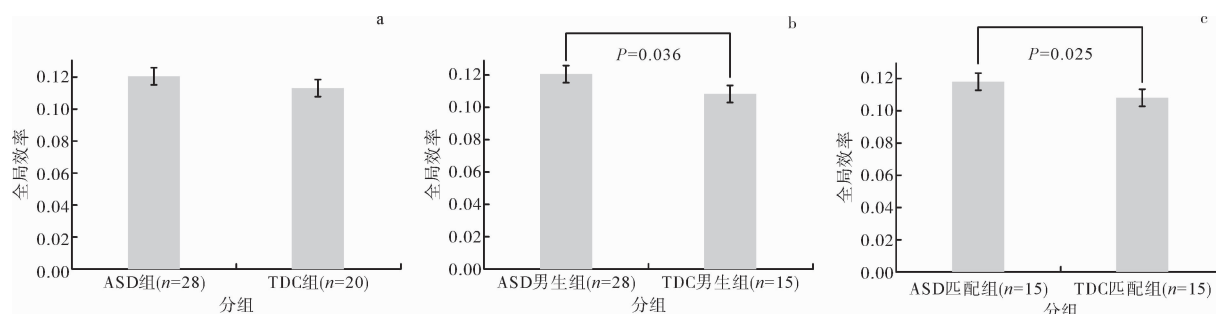


图 6 ASD 组与 TDC 组局部效率差异

Fig. 6 Differences in local efficiency between ASD group and TDC group

往研究也指出,在 ASD 患者生命早期,PFC 受到过度生长的影响最为严重^[17],这种生长失调对社会认知、情绪加工和语言等功能产生了显著影响,从而造成 ASD 儿童在认知、情绪和语言等方面的缺陷。

本研究还发现,学龄前 ASD 儿童在 mPFC 脑区表现更低的节点效率。节点效率反映了该节点与所有其他节点之间信息传播的能力^[18]。研究表明,学龄前 ASD 儿童的 mPFC 脑区与其他脑区的有效连接较少,从而影响了信息的传递效率,这可能源于突触修剪过程的受阻,进而导致社会认知和行为异常^[19]。该发现与 ASD 儿童在 mPFC 脑区功能连接不足^[20]的结论一致。mPFC 在认知过程、情绪调节、动机和社交等方面扮演重要角色^[21]。同时,有研究认为,ASD 儿童难以理解和参与社交活动,可能与心理理论相关脑区(如 mPFC)功能低下有关^[22]。本研究发现学龄前 ASD 儿童 mPFC 脑网络特征异常,其与心理理论能力的关系值得进一步研究验证。

3.2 ASD 儿童全局指标变化 尽管在全局指标上未发现 ASD 与 TDC 儿童存在显著差异,但针对男性被试的分析显示,ASD 儿童相较于 TDC 儿童表现出全局效率较低、局部效率较高的趋势。这可能表明女性被试的加入影响了 ASD 儿童的脑网络特征,与既往研究发现性别影响 ASD 群体的脑功能连接^[23]的结论一致。而本研究女性被试数量

有限,故未对性别影响进行深入分析,未来可进一步探讨性别因素在 ASD 儿童脑功能网络中的影响。

全局效率反映了脑网络的整合信息处理能力^[24],而局部效率则代表了局部信息处理能力及网络抗攻击能力^[25]。研究发现,ASD 儿童具有较低的全局效率和较高的局部效率,与 ASD 儿童局部连通性增强、长距连通性减弱的假说^[26]相符。这可能意味着学龄前 ASD 儿童大脑 PFC 相邻区域的连接增强,而远距离的连接减弱,导致脑网络整合能力降低,功能分离代偿性增加^[27]。已有研究指出,ASD 儿童在成长过程中全局效率逐渐降低而局部效率维持稳定^[4,28],且 ASD 行为症状与网络效率下降有关^[29]。因此,PFC 区域全局效率降低可能是 ASD 儿童病理机制之一。

综上所述研究表明,mPFC 是学龄前 ASD 儿童重要的信息处理中枢,但在信息整合和全局信息传递方面存在缺陷,而在局部信息的传递和分化方面却表现优异。虽然如此,本研究仍存在一些局限性:1)样本量相对较小,未来可开展多中心合作研究,纳入更多被试以验证研究结论;2)研究发现性别因素影响全局网络指标,可进一步深入探讨不同性别 ASD 儿童的脑网络特征;3)fNIRS 仅覆盖前额叶皮层,缺乏对其他脑区的测试,未来可扩大测试范围,进一步阐明 ASD 儿童的病理机制。

参考文献

- [1] Shen L, Liu X, Zhang H, et al. Biomarkers in autism spectrum disorders: Current progress[J]. Clin Chim Acta, 2020 (502):41-54.
- [2] Luyster R, Gotham K, Guthrie W, et al. The Autism Diagnostic Observation Schedule—Toddler Module: A new module of a standardized diagnostic measure for autism spectrum disorders[J]. J Autism Dev Disord, 2009(39):1305-1320.
- [3] Cao W, Zhu H, Li Y, et al. The development of brain network in males with autism spectrum disorders from childhood to adolescence: Evidence from fNIRS study[J]. Brain Sci, 2021, 11(1):120-133.
- [4] 刘宇翀, 朱绘霖, 曹伟, 等. 孤独症谱系障碍儿童功能性近红外光谱成像拓扑结构 44 例病例系列报告[J]. 中国循证儿科杂志, 2021, 16(3):218-224.
Liu YC, Zhu HL, Cao W, et al. Functional near-infrared imaging topology in 44 children with autism spectrum disorder: A case series report[J]. Chin J Evid Based Pediatr, 2021, 16(3):218-224. (in Chinese)
- [5] Itahashi T, Yamada T, Watanabe H, et al. Altered network topologies and hub organization in adults with autism: A resting-state fMRI study [J]. PLoS One, 2014, 9(4):e94115.
- [6] Association AP. Diagnostic and statistical manual of mental disorders(DSM-5)[M]. 5th ed. Washington, DC: American Psychiatric Association Press, 2013:46-55.
- [7] 杨玉凤. 儿童发育行为心理评定量表[M]. 2 版. 北京: 人民卫生出版社, 2023, 74-76.
Yang YF. Rating scales for children's developmental behavior and mental health[M]. 2th ed. Beijing: People's Medical Publishing House Co., LTD, 2023, 74-76. (in Chinese)
- [8] Ye JC, Tak S, Jang KE, et al. NIRS-SPM: Statistical parametric mapping for near-infrared spectroscopy[J]. Neuroimage, 2009, 44(2):428-447.
- [9] Xia M, Wang J, He Y. Brain net viewer: A network visualization tool for human brain connectomics[J]. PLoS One, 2013, 8(7):e68910.
- [10] Li Y, Yu D. Weak network efficiency in young children with autism spectrum disorder: Evidence from a functional near-infrared spectroscopy study [J]. Brain Cogn, 2016 (108):47-55.
- [11] Xu J, Liu X, Zhang J, et al. FC-NIRS: A functional connectivity analysis tool for near-infrared spectroscopy data [J]. Biomed Res Int, 2015(1):1-11.
- [12] Abdalmalak A, Novi SL, Kazazian K, et al. Effects of systemic physiology on mapping resting-state networks using functional near-infrared spectroscopy[J]. Front Neurosci, 2022(16):803297.
- [13] Zhou X, Sobczak G, McKay CM, et al. Comparing fNIRS signal qualities between approaches with and without short channels[J]. PLoS One, 2020, 15(12): e0244186.
- [14] Wang J, Wang X, Xia M, et al. GREYNA: A graph theoretical network analysis toolbox for imaging connectomics [J]. Front Hum Neurosci, 2015(9):386.
- [15] Guan X, Guo T, Zeng Q, et al. Oscillation-specific nodal alterations in early to middle stages Parkinson's disease[J]. Transl Neurodegener, 2019(8):1-16.
- [16] Képes T. The critical node detection problem in hypergraphs using weighted node degree centrality [J]. Peer J Comput Sci, 2023(9):e1351.
- [17] Courchesne E, Pierce K. Brain overgrowth in autism during a critical time in development: Implications for frontal pyramidal neuron and interneuron development and connectivity[J]. Int J Dev Neurosci, 2005, 23(2-3):153-170.
- [18] He Y, Evans A. Graph theoretical modeling of brain connectivity[J]. Curr Opin Neurol, 2010, 23(4):341-350.
- [19] 拉·施赖布曼. 追寻自闭症的真相[M]. 上海: 上海人民出版社, 2013.
- [20] 史姗姗, 杨文韬, 王颖鹏, 等. 静息态下孤独症谱系障碍儿童大脑前额叶的功能连接特征研究[J]. 中国康复医学杂志, 2023, 38(5):651-655.
Shi SS, Yang WT, Wang YP, et al. Resting-state functional connectivity of prefrontal cortex in children with autism spectrum disorder[J]. Chin J Rehabil Med, 2023, 38(5):651-655. (in Chinese)
- [21] Xu P, Chen A, Li Y, et al. Medial prefrontal cortex in neurological diseases[J]. Physiol Genomics, 2019, 51(9):432-442.
- [22] Kana RK, Maximo JO, Williams DL, et al. Aberrant functioning of the theory-of-mind network in children and adolescents with autism[J]. Mol Autism, 2015(6):1-12.
- [23] Alaerts K, Swinnen SP, Wenderoth N. Sex differences in autism: A resting-state fMRI investigation of functional brain connectivity in males and females [J]. Soc Cogn Affect Neurosci, 2016, 11(6):1002-1016.
- [24] Wang X, Zhang H, Wang B, et al. Abnormalities of efficiency in resting state functional brain network in first-episode paranoid schizophrenia[J]. Chin J Behav Med Brain Sci, 2021:219-225.
- [25] Mihaescu AS, Kim J, Masellis M, et al. Graph theory analysis of the dopamine D2 receptor network in Parkinson's disease patients with cognitive decline[J]. J Neurosci Res, 2021, 99(3):947-965.
- [26] Nomi JS, Uddin LQ. Developmental changes in large-scale network connectivity in autism[J]. Neuroimage Clin, 2015 (7):732-741.
- [27] 何文娟, 谢琦, 王雅杰, 等. 基于图论的轻度认知障碍患者功能脑网络研究[J]. 磁共振成像, 2022, 13(5):1-5.
He WJ, Xie Q, Wang YJ, et al. A study of functional brain networks in patients with mild cognitive impairment based on graph theory[J]. Chin J Magn Reson Imaging, 2022, 13(5):1-5. (in Chinese)
- [28] Hu Z, Liu G, Dong Q, et al. Applications of resting-state fNIRS in the developing brain: A review from the connectome perspective[J]. Front Neurosci, 2020(14):1-12.
- [29] Li Y, Yu D. Variations of the functional brain network efficiency in a young clinical sample within the autism spectrum: A fNIRS investigation[J]. Front Physiol, 2018(9):1-11.

收稿日期: 2024-07-19 修回日期: 2024-11-01 本文编辑: 李少闻